

## 개선된 Hopfield Network 모델과 Layer assignment 문제에서의 응용

o 김 계현, 황 의용, 이 종호

\* 서울대 컴퓨터 공학과, 서울대 컴퓨터 공학과, 인하대 전기 공학과

A Modified Hopfield Network and Its Application  
To The Layer Assignment

Kye Hyun Kim, Hee Yeung Hwang, Chong Ho Lee

Computer Engineering, Computer Engineering Seoul National Univ.,

Electrical Engineering Inha Univ.

## Abstract

A new neural network model, based on the Hopfield's crossbar associative network, is presented and shown to be an effective tool for the NP-Complete problems. This model is applied to a class of layer assignment problems for VLSI routing. The results indicate that this modified Hopfield model improves stability and accuracy.

## 요 약

Hopfield crossbar associative network을 기초로한 개선된 Hopfield neural network을 제안하고, 이 network이 NP-complete 문제에 대한 효과적인 tool임을 보였다.

이 모델을 VLSI routing을 위한 layer assignment 문제에 응용하였고, 결과 이 개선된 Hopfield model이 stability와 accuracy를 향상시킴을 보여 주었다.

## 1. 서론

Hopfield network이 associative memory로서 뿐만 아니라, NP-complete 문제를 해결하는데도 효과적으로 사용될 수 있다는 것이 이미 알려진 바 있다[1,2,3]. 본 논문은 Hopfield network의 또 다른 응용 분야로서, 이것은 공학 분야에 응용될 가능성이 크게 예상된다. 원래의 Hopfield network이 출력의 stability와 global optimality를 얻을 probability를 향상시키기 위해 그림 1과 같이 개선하였다. 이 새로운 model을 layer assignment 문제에 응용하였다.

효과적인 layer assignment는 VLSI 회로의 routing에 매우 중요한 역할을 하는데, routability와 via의 갯수가 이에 직접적인 영향을 받기 때문이다.

이전의 연구들 중의 하나[4,5]는 minimum-via layer assignment 문제를 해결하기 위해 graph-theoretical approach를 이용하였다. 이 논문에서는 같은 문제를 해결하기 위해 neural network 방법을 시도하였다.

## 2. 문제 제시

Layer assignment 문제는 각 wire segment에 주어진 layer중의 하나를 할당시키는 문제인데, 서로 다른 net의 두 wire segment가 같은 layer에서 교차해서는 안된다.

복잡한 layer assignment 문제의 첫단계로서, 이 논문의 neural network은 topological layer assignment만 취급하였다. 즉 unconstrained via-minimization (uvn)[6,7] 문제를 해결코자 하였다.

특정 net에 할당되는 layer를 표현하기 위해, Hopfield network은 각 net 당  $M$ 개의 binary output을 생성한다. 이때  $M$ 은 layer의 갯수이다.  $M$  bits 중 한 bit가 net에 할당된 layer임을 나타내게 된다. 따라서 이 논문의 Hopfield Network은  $N$ -net layer assignment를 위해  $NM$  개의 output neuron들로 구성 되어 있다.

## 3. Network 모델

Network design의 첫단계는 Hopfield Network 상에서 valid layer assignment에 대해 최소화 되는 에너지 함수를 결정하는 것이다[1]. 에너지 함수는 3개의 항으로 구성되어 있고, 각 항은 적당한 layer 할당을 위한 출력 pattern의 constraint들을 나타낸다.

$$E = k_1 \sum_{i,j} \sum_{a,b} O_{ia} O_{jb} + k_2 \sum_i (\sum_a (O_{ia})^2 - 1)^2 + k_3 \sum_i ((\sum_a (O_{ia})^2)^2 - \sum_a O_{ia}) \quad (1)$$

이때  $i, j$  는 net index,  $a, b$  는 layer index,  $n_i$  는  $i$ 번째 net,  $n_i^a$  는  $i$ 번째 net의  $a$ 번째 layer임을 나타내며,  $k_1, k_2, k_3$  는 상수들이다. 첫번째 항은 교차하는 net  $n_i, n_j$  의 모든 쌍이 다른 layer에 있을 때 최소화된다. 두번째 항은 neuron의 출력값이 unit 출력값 1이 되도록 제한시킨다. 세번째 항은 각 net당 오직 한개의 layer만 선택되었을 때 최소가 된다.

위의 식을 Hopfield의 General Equation과 비교하여 weight matrix T와 bias를 구한다.

$$T_{ij}^{ab} = -k_1 C_{ij} (1 - \delta_{ij}) \delta_{ab} - (k_2 + k_3) \delta_{ij} \quad \text{-----}(2)$$

$$B_j^b = 2k_2 + k_3 \quad \text{-----}(3)$$

$$\text{bias} = (\text{net index} - \text{layer index})/10 = (i - a)/10$$

각 neuron당 해당 1, a에 따른 입력 line

$C_{ij}$  는 intersection matrix,  $\delta_{ij}$  는 kronecker delta 함수이다.

bias는 network의 성능을 향상시켰다. network의 수렴을 가속화하기 위해 첫번째 bias 항  $2k_2$ 를 weight matrix T의 대각선,  $T_{ij}^{bb}$ 속으로 넣었다. 두번째 bias는 net i에 대해, 동일한 가능성을 가진 layer들 사이에 우선 순위를 주기위한 것이다.

이 논문의 개선된 Hopfield Network은 그림 1과 같이 unit delay를 가진 feedback loop을 더해야 한다. 식 (4)와 (5)는 network의 작동을 나타낸다. delayed feedback은 출력의 갑작스러운 변화를 방지하여 최소-에너지 지점으로 서서히 수렴하도록 한다.

식 (4)의 상수 a는 수렴 속도와 출력의 stability 사 이를 조정한다.

$$I_a(t) = \alpha \sum_{i,j} \sum_{a,b} T_{ij}^{ab} O_b(t) + I_a(t-1) + \text{bias} \quad \text{----}(4)$$

$$O_a(t) = S(I_a(t-1)) \quad \text{-----}(5)$$

이 때  $s(x)=1/(1+e^{-2x})$  이다.

4. Simulation 결과

이 network 모델을 식(2)와 식(3)의 T와 B의 connection strength를 이용하였고 식 (4), (5)와 같

이 동작한다. bias  $2k_2$ 를 connection matrix의 대각선,  $T_{ij}^{bb}$ 에 넣는 것이 안정된 출력 값을 내는시간을 단축시킨다는 것을 실험 결과 확인 할 수 있었다. 포 1에서는 실험 결과를 보여 준다. 실험적인 방법을 통해 변수 들을 다음과 같이 set시켰다.:  $k_1=k_2=5, k_3=k_1/10, \alpha=0.2, \beta=2$ . 인접 matrix는 net의 교차(intersection)를 나타낸다.

다음 실험은 coprocessor가 없는 IBM PS/2를 사용하였고, 안정된 상태의 출력을 얻는데에 2-45 CPU second가 소요되었다.

5. 논의

새로운 개선된 Hopfield Neural Network model을 제안하고, 이를 test하였다. 이 모델의 중요한 점은 안정성(stability)의 정도를 조정할 수 있고, 이로 인해 안정성이 향상되었으며, global optimality를 얻을 수 있었다는 점이다. 실험한 모든 경우에 대해, 모든 초기 입력 값에 대하여 이상적인 layer assignment를 얻을 수 있었다. 완전한 출력을 얻어 내는 매개 변수 들의 집합이 존재하리라 예상된다. 좀 더 복잡한 연구 단계로서, layer의 갯수를 줄이고 최소 갯수의 via를 할당 시키는 것이 다음 단계의 연구 목표이다. 이 모델에 대한 다음 단계의 연구 목표이다. 이 모델에 대한 모듈 형식의 chip 구조가 개발 중에 있다. 지연된 feedback loop를 위한 chip 면적의 증가와 대각선 bias의 첨가는 설계에 있어서 큰 문제는 아니다.

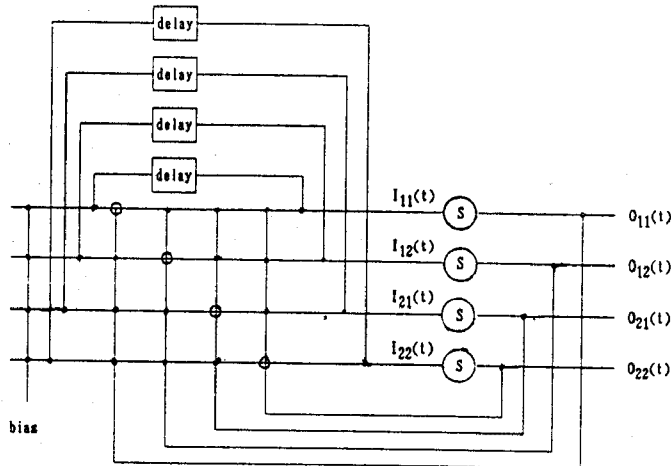


그림 1. layer assignment problem을 위한 개선된 Hopfield Network

6. 참고 문헌

[1] E. D. Dahl, "Neural Network Algorithm for an NP-Complete Problem : Map and Graph Coloring", International Conference on Neural Network, San Diego, California, June 21-24, 1987, pp III-113 - III-120

[2] S. U. Hegde, J. L. Sweet and W. B. Levy, "Determination of parameters in a Hopfield/Tank Computational Network", International Conference on Neural Networks, Sandiego, California, July, 24-27, 1986, pp II-129 - II-298

[3] D. W. Tank and J. J. Hopfield, "Simple Neural Optimization Networks : An A.D converter, Signal Decision Circuit, and a Linear Programming Circuit:", IEEE Transactions on Circuits and systems, May 1986, pp 533-541

[4] C. H. Lee and, "On Multilayer Switchbox Routing", 30th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Syracuse, Aug. 1987, pp 301 - 304

[5] C. H. Lee and D. GU, "Via-Minimization Expert for the Multilayer Switchbox Routing", International Journal of Computer Aided VLSI Design, to Appear, also in INCV, Seoul, Ocy. 1989.

[6] C. H. Lee, "Multilayer Routing Problem", Progress in Computer Aided VLSI Design, Vol. 2, ed. G. Zobrist, Ablex Publishing, New Jersey, 1989.

[7] C.-P. Hsu. :Minimum-Via Topological Routing", IEEE Transactions on CAD, Oct. 1983, pp 235 - 246.

표 1. Simulation 결과

Net의 갯수	Layer의 갯수	인접 matrix와 할당된 최종 layer																																																																																																																																																																																																																																																																										
3	3	1) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>A</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>C</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	A	1	1	1	1	C	2	1	1	1	B	3	1	1	1	2) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>C</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>A</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	C	1	1	1	0	B	2	1	1	1	A	3	0	1	1	L : layer index N : net index																																																																																																																																																																																																																																
L	N	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																								
A	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																								
C	2	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																								
B	3	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																								
L	N	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																								
C	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																								
B	2	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																								
A	3	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																								
5	4	3) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>B</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>C</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>D</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>A</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	4	5	B	1	1	0	0	0	1	C	2	0	1	0	0	1	B	3	0	0	1	0	1	D	4	0	0	0	1	1	A	5	1	1	1	1	1	4) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>A</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>C</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>D</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	4	5	A	1	1	1	0	0	0	B	2	1	1	1	1	0	A	3	0	1	1	1	1	C	4	0	1	1	1	1	D	5	0	0	1	1	1																																																																																																																																																																																					
L	N	1	2	3	4	5																																																																																																																																																																																																																																																																						
B	1	1	0	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
C	2	0	1	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
B	3	0	0	1	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
D	4	0	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
A	5	1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
L	N	1	2	3	4	5																																																																																																																																																																																																																																																																						
A	1	1	1	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																						
B	2	1	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																						
A	3	0	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
C	4	0	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
D	5	0	0	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																						
10	4	5) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>D</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>A</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>7</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>8</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>D</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>C</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	A	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	C	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	D	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	A	4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	B	5	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	B	6	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	C	7	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	A	8	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	D	9	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	C	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	6) <table border="1"> <tr><td>L</td><td>N</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>D</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>D</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>7</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>8</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>9</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>C</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	L	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	D	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	B	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	A	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	C	4	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	D	5	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	A	6	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	C	7	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	A	8	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	B	9	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	C	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
L	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
D	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
B	5	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
B	6	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	7	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	8	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
D	9	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
L	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
D	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
B	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	4	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
D	5	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	6	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	7	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	8	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																	
B	9	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																	